

УДК 681.3

СГЛАЖИВАНИЕ ВЕКТОРНЫХ ПОЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОВЕРХНОСТИ БЕЗЬЕ ПРИ ОЦЕНКЕ ДЕФОРМАЦИИ МЕТОДОМ КОРРЕЛЯЦИИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ*

С. В. Панин^{1,2}, В. В. Титков¹, П. С. Любутин¹

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
634021, г. Томск, просп. Академический, 2/4

²Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, просп. Ленина, 30

E-mail: svp@ispms.tsc.ru

Исследовано применение в качестве сглаживающего фильтра для векторных полей поверхности Безье. Определены преимущества поверхности Безье перед фильтром скользящего среднего. Модифицирован алгоритм адаптации размера апертуры фильтра. Рассмотрена эффективность адаптации размера апертуры при обработке векторных полей в задаче оценки деформации материалов методом корреляции цифровых изображений.

Ключевые слова: сглаживание, поверхность Безье, адаптация апертуры, векторное поле, интенсивность деформации сдвига.

Введение. Метод корреляции цифровых изображений является одним из перспективных подходов к изучению процессов деформации и разрушения структурно-неоднородных материалов. Метод основан на построении векторов перемещений, направлен на определение оптического потока с последующим расчётом компонент деформации и реализуется с использованием процедуры численного дифференцирования [1–3]. Вследствие низкого качества подготовки поверхности исследуемого материала, а также наличия шумов на оптических изображениях (зачастую с неизвестным характером их распределения) при обработке экспериментальных данных могут возникать ошибки в определении перемещений, что, в свою очередь, обуславливает появление ошибок при оценке деформации. Решение указанной проблемы может быть достигнуто несколькими способами. В частности, в работе [4] обсуждались вопросы фильтрации векторных полей с помощью известных подходов (медианная фильтрация, фильтр скользящего среднего и др.). Также могут быть использованы сложные алгоритмы определения перемещений [1, 5] и привлечены методы их сглаживания (постобработка).

Цель предлагаемой работы — исследование эффективности применения поверхности Безье и адаптации размера апертуры фильтра для сглаживания векторных полей на примере обработки модельных и экспериментальных данных. В механике деформированного твёрдого тела одним из распространённых параметров оценки состояния нагруженных материалов является интенсивность деформации сдвига [4]. Этот параметр рассчитывается путём численного дифференцирования поля перемещений. В данной работе оценка эффективности сглаживания векторных полей проводилась путём расчёта численных значений интенсивности деформации сдвига.

1. Методика исследований. 1.1. *Модельные векторные поля.* Для тестирования предложенных алгоритмов были реализованы два типа распределений перемещений. В

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 13-07-00009_а) и Сибирского отделения РАН (проект № III.23.1.3).

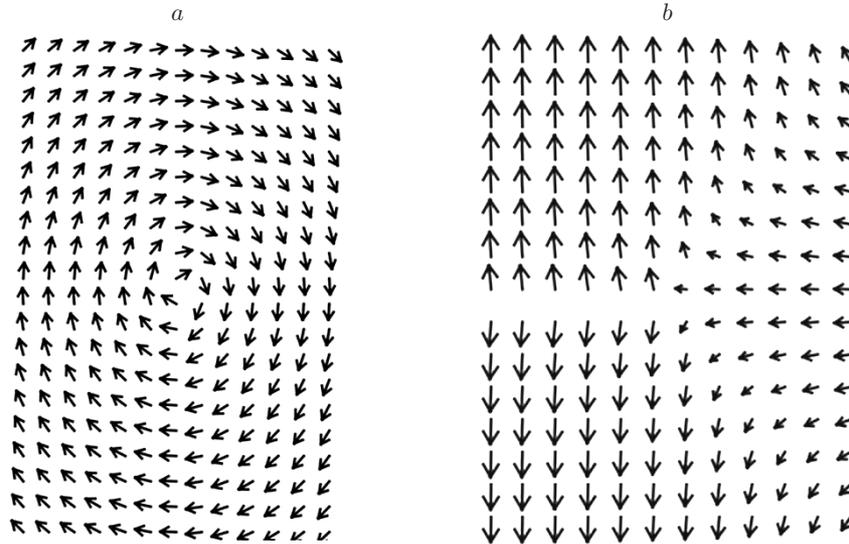


Рис. 1. Модельные векторные поля: воронка (а), трещина (b)

первом случае они имели характер вихревого вращения и названы «воронкой», в то время как во втором случае они символизируют процесс раскрытия трещины и именуется «трещиной» (рис. 1). Искажение полей обоих типов производили наложением шумов.

В основе метода генерации шума лежит преобразование последовательности случайных чисел с равномерным распределением в последовательность чисел с нормальным распределением. Для генерации первой последовательности использовался линейный конгруэнтный метод [6]. Шум накладывался на каждый элемент векторного поля, отдельно на каждую горизонтальную и вертикальную составляющие вектора:

$$x_{ш_i} = \begin{cases} A_{ш}N_i & \text{при } u_i \leq p_{ш}, \\ 0 & \text{при } u_i > p_{ш}, \end{cases}$$

где N_i — последовательность чисел с нормальным распределением величин; u_i — последовательность случайных равномерно распределённых величин. Параметрами зашумления являлись вероятность появления шума $p_{ш}$ и его максимальная амплитуда $A_{ш}$ [4].

Единица (дискрет изменения) на шкале изменения величины шума принимается равной средней длине векторов по всему полю. Примеры «зашумлённых» полей в данной работе не приведены вследствие слабого визуального отличия изменений на векторных полях относительно исходного (при использованных величинах параметров зашумления $A_{ш} = 0,01$, $p_{ш} = 90\%$). Выбор величин параметров осуществляли таким образом, чтобы величины дисперсии интенсивности деформации модельного поля и экспериментально построенных векторных полей были соизмеримы (см. разд. 3).

1.2. *Методы сглаживания векторных полей.* В качестве сглаживающих фильтров в представленной работе были взяты фильтр скользящего среднего (ФСС) [7] и поверхность Безье [8]. Сглаживание с использованием последней заключается в построении поверхности Безье размера порядка n, m по $(n+1) \times (m+1)$ контрольным точкам $P_{i,j}$, попадающим в апертуру. Точки поверхности рассчитываются следующей параметризацией:

$$p(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m B_i^n(u) B_j^m(v) P_{i,j},$$

где $u, v \in (0, 1)$; B — многочлен Бернштейна, вычисленный из выражения

$$B_i^n(u) = \frac{n!}{i!(n-i)!} u^i (1-u)^{n-i}.$$

1.3. *Адаптация апертуры.* При оценке деформации методом корреляции цифровых изображений нередко в пределах единого векторного поля длины векторов в разных его частях заметно различаются. При этом области векторного поля характеризуются разными величинами дисперсии векторов. В результате и абсолютный уровень шума в областях, характеризующихся большей дисперсией векторов, является более высоким. По этой причине в данных областях требуется сильнее сглаживать векторы перемещений. Таким образом, возникает необходимость адаптации апертуры сглаживающего фильтра.

В работе [9] предложен способ адаптации апертуры фильтра, когда в зависимости от величины средней («глобальной») дисперсии по всему анализируемому полю и ряда локально вычисляемых параметров независимо друг от друга меняются четыре составляющие размера апертуры. Этот алгоритм позволяет при фильтрации сохранять резкие границы объектов в рамках обрабатываемого поля.

Для решения задачи, поставленной в данной работе, предлагается использовать алгоритм, описанный в [9], но со следующей модификацией: окончательный размер апертуры R_0 находится путём вычитания рассчитанного значения R (согласно обозначениям, введённым в исходный алгоритм [9]) из максимально возможного размера апертуры фильтра R_{\max} : $R_0 = R_{\max} - R$. Это позволяет на участках с большей дисперсией векторов использовать апертуру фильтра больших размеров и в областях с минимальной дисперсией применять апертуру минимального размера.

2. Исследование алгоритмов сглаживания на примере модельных векторных полей. Исследования модельных векторных полей проводили в несколько этапов: 1) генерация модельного векторного поля (см. рис. 1); 2) моделирование и наложение шума на векторное поле; 3) сглаживание векторного поля; 4) расчёт величин интенсивности деформации сдвига (SSI — Shear Strain Intensity) и последующее построение карты её распределения (рис. 2); 5) поиск участка минимальной ненулевой дисперсии на векторном поле и в поле интенсивности деформации сдвига.

Методика оценки минимальной дисперсии D_{\min} основана на разделении всего поля на блоки размером $M = m \times m$ с последующим нахождением их дисперсии D и выборе её минимального значения:

$$D_{\min} = \min_k \{D\}, \quad D_{vf} = \frac{1}{2M} \sum_{i=1}^m \sum_{i=1}^m (x - \bar{x})^2 + (y - \bar{y})^2,$$

$$D_{SSI} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^m \sum_{i=1}^m (s - \bar{s})^2, \quad k = (w - m + 1)(h - m + 1),$$

где D_{vf} и D_{SSI} — дисперсии для векторного поля и поля интенсивности деформации; x и y — значения компонент векторов; \bar{x} и \bar{y} — среднеарифметические значения компонент векторов в заданном окне $m \times m$; s — значения поля интенсивности деформации; \bar{s} — среднеарифметические значения s в заданном окне $m \times m$.

Из полученных при обработке векторного поля типа воронка распределений интенсивности деформации (рис. 2, $a-f$) видно, что наилучший эффект от сглаживания (подобие исходного и фильтрованного полей деформации) достигается при использовании ФСС с

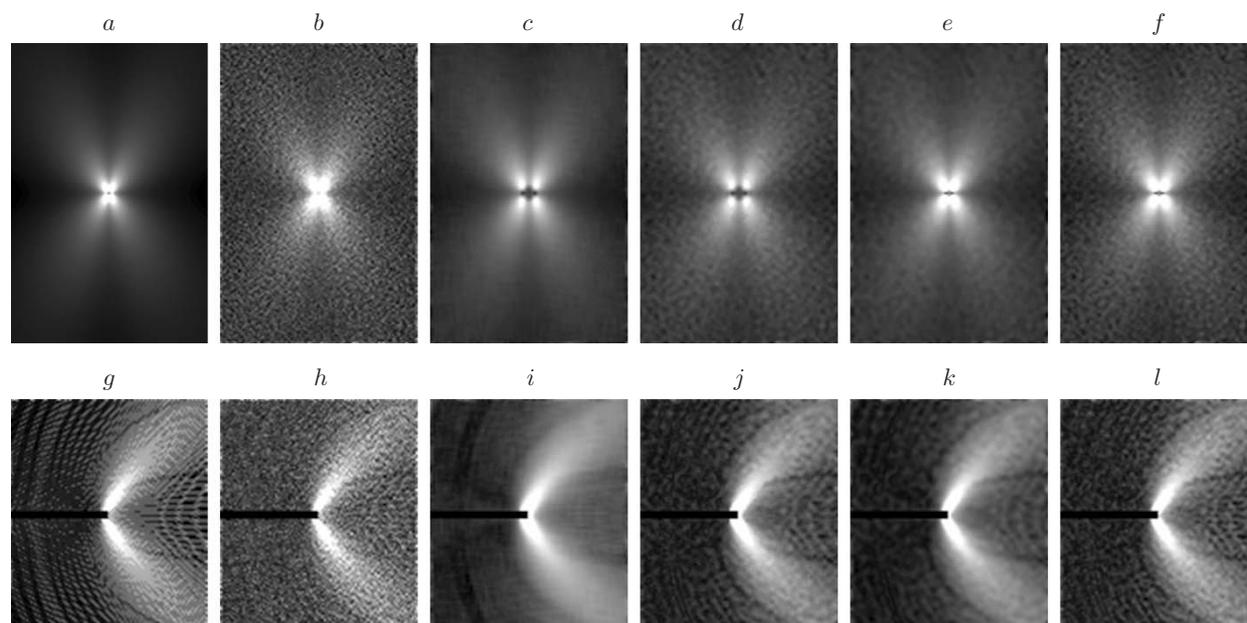


Рис. 2. Распределение интенсивности деформации сдвига при сглаживании модельных векторных полей типа воронка (a — f) и трещина (g — l): a, g — исходное; b, h — зашумлённое; c, d, i, j — сглаженное ФСС; e, f, k, l — сглаженное поверхностью Безье. Тип апертуры: c, e, i, k — постоянная, d, f, j, l — адаптивная

постоянной апертурой (см. рис. 2, c). В этом случае с поля деформации в значительной степени удаляется предварительно наложенный высокочастотный шум (см. рис. 2, b) и сохраняется локализация интенсивности деформации в центре анализируемого распределения. Применение поверхности Безье с постоянным размером апертуры (см. рис. 2, e) даёт более точное сохранение распределения в области максимума SSI, однако уровень шума остаётся несколько более высоким по сравнению с использованием ФСС (хоть и в меньшей степени, чем на зашумлённом поле SSI, см. рис. 2, b). На изображениях распределения SSI после использования ФСС с адаптацией апертуры (см. рис. 2, d, f) большая степень сглаживания достигается в областях, характеризующихся более высокой дисперсией. Подобные заключения верны и для случая векторного поля типа трещина (рис. 2, g — l).

Для количественной оценки степени эффективности типов сглаживания были рассчитаны значения минимальной дисперсии для каждого из них (табл. 1). Видно, что в случае применения поверхности Безье с постоянной апертурой значение минимальной дисперсии наиболее близко к значению исходного векторного поля, что согласуется с визуальной оценкой полученных распределений SSI. Таким образом, для сглаживания предпочтительнее именно этот способ обработки векторного поля.

3. Исследование эффективности сглаживания векторных полей по экспериментальным данным. Для обработки экспериментальных данных использовались полученные при статическом растяжении изображения поверхности образца алюминиевого сплава Д16, содержащего боковой I-образный надрез (краевую трещину) шириной 0,5 мм и глубиной 3 мм. Эта серия изображений характеризует деформацию при раскрытии трещины (более подробно условия проведения эксперимента и процедура регистрации изображений описаны в [10]). Исходное векторное поле приведено на рис. 3. На рис. 4, a видно, что для распределения SSI, полученного при обработке исходного векторного поля, характерно заметное количество шумов. Соответствующие поля интенсивности деформации, построенные для различных параметров сглаживания, представлены на рис. 4, b — e . Как

Таблица 1

**Влияние типа фильтрации (сглаживания)
на результаты расчёта интенсивности деформации сдвига
на модельных векторных полях типа воронка/трещина**

Тип сглаживания	Тип апертуры	Среднее значение интенсивности деформации сдвига	Минимальная дисперсия	
			для векторного поля	для поля интенсивности деформации
Исходное поле	—	$8,08 \cdot 10^{-4} / 2,24 \cdot 10^{-4}$	$2,11 \cdot 10^{-5} / 1,06 \cdot 10^{-5}$	$7,58 \cdot 10^{-9} / 1,18 \cdot 10^{-8}$
Зашумлённое поле	—	$2,28 \cdot 10^{-3} / 2,79 \cdot 10^{-4}$	$2,38 \cdot 10^{-5} / 1,17 \cdot 10^{-5}$	$7,74 \cdot 10^{-8} / 1,92 \cdot 10^{-8}$
ФСС	Постоянная	$6,73 \cdot 10^{-4} / 2,05 \cdot 10^{-4}$	$2,09 \cdot 10^{-5} / 1,02 \cdot 10^{-5}$	$6,45 \cdot 10^{-9} / 8,95 \cdot 10^{-10}$
	Адаптивная	$6,82 \cdot 10^{-4} / 2,14 \cdot 10^{-4}$	$2,09 \cdot 10^{-5} / 1,04 \cdot 10^{-5}$	$1,28 \cdot 10^{-8} / 1,52 \cdot 10^{-9}$
Поверхность Безье	Постоянная	$6,96 \cdot 10^{-4} / 2,08 \cdot 10^{-4}$	$2,08 \cdot 10^{-5} / 1,03 \cdot 10^{-5}$	$8,66 \cdot 10^{-9} / 1,40 \cdot 10^{-9}$
	Адаптивная	$7,04 \cdot 10^{-4} / 2,18 \cdot 10^{-4}$	$2,10 \cdot 10^{-5} / 1,05 \cdot 10^{-5}$	$1,66 \cdot 10^{-8} / 1,98 \cdot 10^{-9}$

и в случае с модельным векторным полем, результат сглаживания заметен только на распределении SSI, поэтому в данной работе не рассматриваются сглаженные векторные поля.

Из приведённых полей деформаций видно, что подобно обработке модельных данных лучший визуальный эффект сглаживания обеспечивается при постоянной величине апертуры (см. рис. 4, *b, d*). К сожалению, исходные экспериментальные результаты не позволяют абсолютно достоверно предположить, как должно выглядеть скорректированное векторное поле и, соответственно, поле деформации. В связи с этим авторы оставляют за собой право субъективной оценки достигнутых улучшений. Ещё одним способом визуализации результатов сглаживания является картина распределения параметра минимальной дисперсии SSI в окне, поля которого приведены на рис. 4, *f—j*. С одной стороны, видно, что все использованные методики сглаживания позволяют заметно снизить данный параметр,

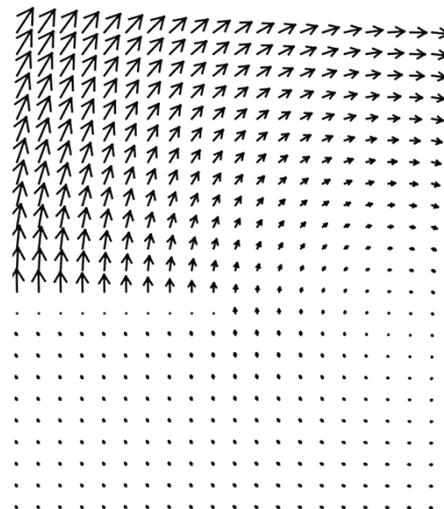


Рис. 3. Экспериментально полученное векторное поле

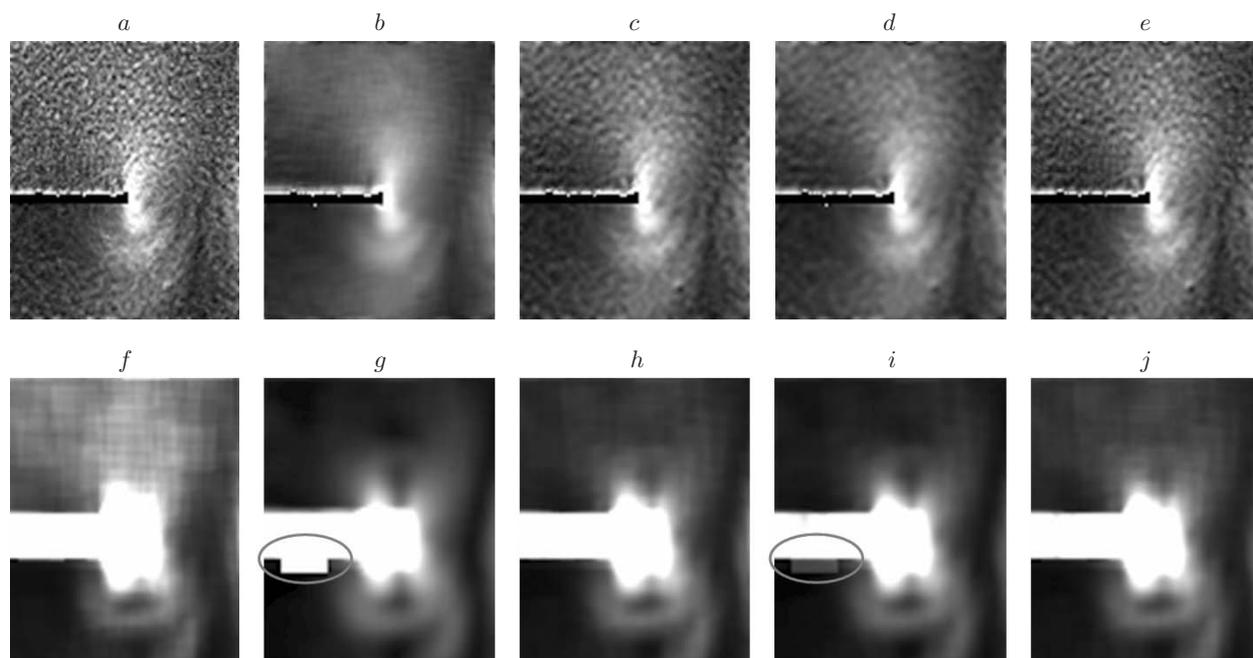


Рис. 4. Распределение интенсивности деформации сдвига ($a—e$) и минимальной дисперсии SSI в окне ($f—j$) для экспериментального векторного поля: исходное (a, f); сглаженное ФСС (b, c, g, h); сглаженное поверхностью Безье (d, e, i, j). Тип апертуры: постоянная (b, d, g, i) и адаптивная (c, e, h, j)

однако вновь постоянный размер апертуры оказывается более предпочтительным. Следует отметить возникновение в этом случае артефакта в виде фрагмента, не содержащего полезной информации (на рис. 4, g, i выделен овалом). Подобный эффект не проявляется при применении фильтров с адаптивным размером апертуры. Несмотря на это соответствующая область на поле интенсивности деформации практически не искажается (либо изменяется в минимальной степени).

Для получения интегральной количественной оценки результатов сравнения различных методик фильтрации (по аналогии с разд. 2) была построена табл. 2, содержащая информацию о величине средней SSI и минимальной дисперсии в окне. Анализ приведённых данных показал, что в результате применения процедуры сглаживания практически

Таблица 2

Результаты исследований эффективности сглаживания
по экспериментально полученным векторным полям

Тип сглаживания	Тип апертуры	Среднее значение интенсивности деформации сдвига	Минимальная дисперсия	
			для векторного поля	для поля интенсивности деформации
Исходное поле	—	$1,64 \cdot 10^{-3}$	$1,97 \cdot 10^{-4}$	$7,00 \cdot 10^{-7}$
ФСС	Постоянная	$1,39 \cdot 10^{-3}$	$1,97 \cdot 10^{-4}$	$6,07 \cdot 10^{-8}$
	Адаптивная	$1,42 \cdot 10^{-3}$	$1,97 \cdot 10^{-4}$	$1,60 \cdot 10^{-7}$
Поверхность Безье	Постоянная	$1,39 \cdot 10^{-3}$	$1,97 \cdot 10^{-4}$	$1,00 \cdot 10^{-7}$
	Адаптивная	$1,44 \cdot 10^{-3}$	$1,97 \cdot 10^{-4}$	$2,04 \cdot 10^{-7}$

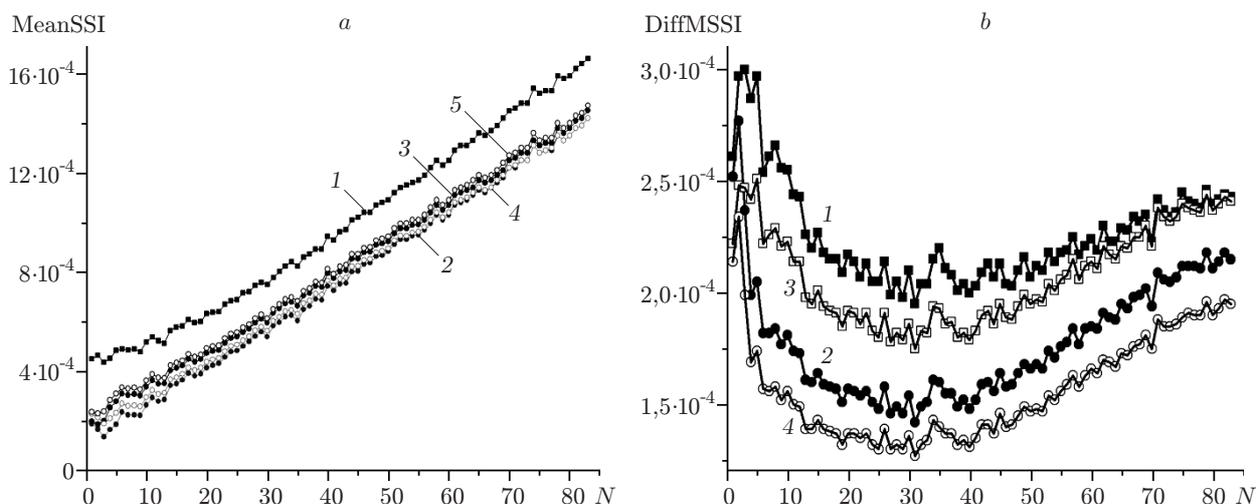


Рис. 5. Графики изменения средней интенсивности деформации MeanSSI (N кадров) (а) (кривая 1 — исходное поле, 2–5 — сглаженные векторные поля) и разность среднего значения SSI исходного и сглаженных векторных полей DiffMSSI (b) (кривые 1, 2 — ФСС с постоянной и адаптивной апертурами, 3, 4 — поверхность Безье с постоянной и адаптивной апертурами)

во всех случаях наблюдается снижение среднего значения SSI по анализируемому полю относительно исходного. При использовании поверхности Безье с постоянной апертурой характер снижения указанного параметра аналогичен случаю применения ФСС.

В табл. 2 приведены данные, отражающие результаты расчёта минимальной дисперсии в расчётном окне (апертуре), которые свидетельствуют о том, что наилучший эффект от сглаживания достигается при использовании поверхности Безье с адаптивной апертурой (минимальная дисперсия в окне сопоставима с дисперсией исходного векторного поля), что также хорошо согласуется с результатами анализа модельных данных (см. табл. 1). В то же время использование ФСС с постоянной апертурой приводит к излишнему сглаживанию, что влечёт за собой ошибку при расчёте величины деформации.

Из рис. 5, а видно, что качественно влияние всех реализованных методик сглаживания подобно: значение анализируемого параметра закономерно снижается, и различие между реализованными методиками выявить практически невозможно. Для этого на рис. 5, б дана величина разности параметра SSI для исходного и сглаженных векторных полей. Видно, что использование адаптивного размера апертуры обеспечивает минимальную величину разности SSI, при этом именно поверхность Безье характеризуется наименьшими значениями для всей серии. Можно констатировать, что поверхность Безье в сопоставлении с ФСС в качестве сглаживающего фильтра для серии изображений более эффективна, прежде всего, с точки зрения обеспечения точности и достоверности расчёта величины интенсивности деформации сдвига.

Заключение. Проведено исследование методов сглаживания на примере обработки модельных и экспериментальных векторных полей. Одной из задач исследования была оценка возможности использования адаптации размера апертуры. На основании анализа полученных данных показаны преимущества применения поверхности Безье перед ФСС и установлено:

1. Более эффективным способом сглаживания для модельных и экспериментально полученных векторных полей является использование поверхности Безье как с постоянным размером апертуры, так и с адаптацией её размера. При этом устраняется высокочастотный шум, но сохраняются и мелкие, и крупные «детали» на поле интенсивности деформации.

2. Эффективность использования ФСС согласно данным расчёта средней величины интенсивности деформации несколько уступает эффективности поверхности Безье, а также сопровождается потерей ряда деталей на картине распределения интенсивности деформации.

3. Адаптация размера апертуры по предложенному алгоритму может применяться для повышения качества сглаживания в обоих случаях, что связано с наличием на векторном поле областей, характеризующихся различной величиной дисперсии векторов.

Таким образом, применение поверхностей Безье с постоянной и адаптивной апертурой может быть рекомендовано для сглаживания векторных полей в задаче оценки деформации материалов методом корреляции цифровых изображений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sutton M. A., Cheng M. Q., Peters W. H. et al. Application of an optimized digital correlation method to planar deformation analysis // Image and Vision Comput. 1986. 4, N 3. P. 143–151.
2. Токарев М. П., Маркович Д. М., Бильский А. В. Адаптивные алгоритмы обработки изображений частиц для расчета мгновенных полей скорости // Вычислительные технологии. 2007. 12, № 3. С. 109–131.
3. Панин С. В., Сырянкин В. И., Любутин П. С. Оценка деформации твердых тел по изображениям поверхности // Автометрия. 2005. 41, № 2. С. 44–58.
4. Панин С. В., Титков В. В., Любутин П. С. Исследование эффективности алгоритмов фильтрации векторных полей при оценке деформации материалов методом корреляции цифровых изображений // Автометрия. 2013. 49, № 2. С. 57–67.
5. Панин С. В., Любутин П. С. Верификация метода оценки деформации на мезоуровне, основанного на построении полей векторов перемещений участков поверхности // Физическая мезомеханика. 2005. 8, № 2. С. 69–80.
6. Кнут Д. Э. Искусство программирования: Учеб. пособие. М.: Вильямс, 2000. Т. 2. 832 с.
7. Воскобойников Ю. Е., Белявцев В. Г. Нелинейные алгоритмы фильтрации векторных сигналов // Автометрия. 1999. № 5. С. 97–105.
8. Роджерс Д., Адамс Дж. Математические основы машинной графики. М.: Мир, 2001. 604 с.
9. Воскобойников Ю. Е., Кузнецов А. М. Новый алгоритм адаптации размера апертуры локальных векторных фильтров // Автометрия. 2005. 41, № 5. С. 3–12.
10. Панин С. В., Бяков А. В., Любутин П. С., Башков О. В. Стадийность локализованной пластической деформации при растяжении образцов сплава Д16АТ по данным акустоэмиссии, картирования деформации на поверхности и тензометрии. Ч. 2. Образцы с надписями различной глубины // Дефектоскопия. 2011. № 12. С. 43–54.

Поступила в редакцию 13 ноября 2012 г.